

## تعیین ظرفیت نصب بهینه نیروگاههای آبی کوچک با استفاده از تراز یابی شاخص های فنی - اقتصادی و قابلیت اطمینان

سید محمد حسن حسینی  
دانشجوی دکتری واحد علوم و تحقیقات  
شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران

حسین هارون آبادی، حسن براتی،  
ناصر قاسمی، غلامرضا کامیاب  
دانشجویان دکتری واحد علوم و تحقیقات

فرشید فروزبخش  
دانشکده برق  
دانشگاه تهران

واژه های کلیدی : ظرفیت نصب، نیروگاههای آبی کوچک، تحلیل اقتصادی، مونت کارلو

نصب بهینه نیروگاه تعیین می شود. الگوریتم فوق بر روی یک نیروگاه آبی کوچک نمونه بنام " ناری " اعمال شده و ظرفیت نصب بهینه  $3.7\text{MW}$  بدست آمده است.

### ۱- مقدمه

نیروگاههای برق آبی کوچک با بهره گیری از سازه های هیدرولیکی ساده، صرف هزینه های اجرائی نسبتا کم و زمان بری میان مدت (درمقایسه با نیروگاههای بزرگ) مورد توجه قرار گرفته و اهمیت ویژه ای یافته اند. این نیروگاهها در زمره نیروگاههای جریان (Run Of The River) قرار دارند، که تولید برق متکی به جریان انحراف یافته از رودخانه است و شامل بند انحرافی، سازه آبگیر، سازه رسوبگیر، کانال انتقال، راه دسترسی، مخزن ذخیره، حوضچه

### چکیده :

یکی از مهمترین موضوعات در طراحی نیروگاههای آبی کوچک جریان رودخانه ای، تعیین ظرفیت نصب بهینه نیروگاه و یا عبارتی برآورد میزان انرژی تولیدی سالانه بهینه آن است. در این مقاله پس از ارائه روشی جهت محاسبه انرژی سالانه، برنامه ای به کمک نرم افزار Excel تهیه شده است که تجزیه و تحلیل اقتصادی نیروگاههای آبی کوچک را به روش آنالیز حساسیت انجام داده، و شاخص های مهم اقتصادی را برآورد می نماید. در مرحله بعد برنامه ای به کمک نرم افزار Matlab تهیه شده است که شاخص های قابلیت اطمینان را به روش مونت کارلو، برای تعدادی از واحدها با منحنی تداوم بار مشخصی، محاسبه می نماید. نهایتا از تراز یابی شاخص های فنی - اقتصادی و شاخص های قابلیت اطمینان، ظرفیت

## ۲-۱ روش انجام محاسبات انرژی

محاسبات انرژی با توجه به جدول دبی کلاسه رودخانه و مقدار آب قابل استحصال از آن (پس از کسر حق آبه های پائین دست و نیازهای محیط زیست)، صورت می گیرد. جهت برآورد انرژی تولیدی ابتدا بر اساس قضاوت کارشناسی، یک محدوده دبی جهت دبی طراحی مشخص می شود، سپس بر اساس آمار روزانه و یا منحنی تداوم جریان ماهانه و دبی با درصدهای احتمال مختلف (بعنوان مثال ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد)، انرژی تولیدی بهینه در هر ماه محاسبه می شود. سپس از مجموع انرژی های ماهانه، انرژی تولیدی سالیانه بهینه بدست می آید. لازم بذکر است که در این محاسبات حجم مختلف مخازن نیز دخالت داده می شود. در انتخاب حجم مخزن قضاوت کارشناسی، جانمایی طرح از نظر محدودیت احداث مخزن و آبدهی رودخانه تواما مد نظر قرار دارند.

بعلاوه با توجه به بخشنامه خرید انرژی توسط وزارت نیرو، تولید انرژی به سه بخش اوج بار (۴ ساعت در روز)، بار عادی (۱۲ ساعت در روز) و کم باری (۸ ساعت در روز) تقسیم شده است. با توجه به بخشنامه فوق الذکر قیمت انرژی به ترتیب در حالت اوج بار نسبت به بار عادی و کم باری و قیمت بار عادی نسبت به کم باری بالاتر است، که مینواند در این بخش مورد توجه طراح قرار گرفته، و گزینه های مختلف با بیشترین تولید انرژی به ترتیب در حالت اوج بار، کم باری و بی باری حاصل شوند. در ضمن ایجاد هماهنگی بین انرژی در حالت های اوج و پایه، می بایستی دقت شود که شاخص های فنی از جمله ضریب کارکرد نیروگاه (Plant Factor) در حد منطقی و قابل قبول برای این نیروگاهها باشد. با توجه به نقش نیروگاههای آبی کوچک در سیستم بار اندازه

تعادل، ساختمان نیروگاه و تجهیزات برق و مکانیک می باشند. جریان انحراف یافته از رودخانه در محل بند انحرافی پس از طی مسیری به محل حوضچه تعادل و از آنجا از طریق لوله پستاک به ساختمان نیروگاه وارد می شود. به منظور استفاده از توان بیشتر نیروگاه در ساعات اوج، قبل از ورودی پستاک یک مخزن تنظیم روزانه قرار داده می شود.

موضوع میزان انرژی تولیدی در ساعات مختلف شبانه روز و یا فصول مختلف سال از مهمترین موضوعات قابل بررسی در نیروگاههای جریانی است. عبارت دیگر تعیین ظرفیت نصب بهینه (دبی طراحی بهینه)، از عوامل مهم در طراحی نیروگاه آبی بشمار می آید.

## ۲-۲ روش تعیین ظرفیت نصب بهینه

تعیین ظرفیت نصب بهینه در نیروگاههای آبی کوچک باید به گونه باشد که شاخص های فنی، اقتصادی و قابلیت اطمینان در مصالحه متقابل قرار داشته باشند. در این راستا ابتدا میزان انرژی سالیانه بهینه از آمار دسته بندی شده دبی روزانه و منحنی تداوم جریان (قابل برداشت) در ماههای مختلف تعیین می شود. پس از مشخص کردن هزینه ها و درآمدهای طرح با انجام مطالعات اقتصادی شاخص های اقتصادی گزینه های مختلف استنتاج می شود. پس از دو مرحله فوق، شاخص های قابلیت اطمینان محاسبه شده و نهایتا با ترازبایی شاخص های فنی، اقتصادی و قابلیت اطمینان می توان گزینه برتر را انتخاب نمود و ظرفیت نصب بهینه را تعیین کرد. در ادامه مقاله نحوه محاسبه شاخص های فنی - اقتصادی و قابلیت اطمینان تشریح شده و فرآیند فوق در طراحی یک نیروگاه آبی کوچک بکار برده می شود.

این شاخص درحالت استاندارد با مخزن ذخیره بین ۳۱-۴۴ درصد و بدون مخزن بین ۴۵-۶۰ درصد پیش بینی شده است [۱].

## ۲-۲ روش انجام محاسبات اقتصادی

در این بخش نحوه برآورد هزینه و درآمد و نهایتاً تحلیل اقتصادی نیروگاههای آبی کوچک پرداخته می‌شود [۲]. هزینه های سرمایه گذاری پروژه در پنج بخش شامل هزینه‌های ساختمانی، تجهیزات الکترومکانیکی، انتقال نیرو، غیرمستقیم و سالیانه بوده و درآمد شامل فروش برق است.

### ۲-۲-۱ هزینه های سرمایه گذاری پروژه

۱. هزینه های ساختمانی : شامل ابنیه و سازه های هیدرولیکی پروژه است که عبارتند از : بند، کانال، سیستم انتقال آب، مخزن تنظیم روزانه، اطاق نیروگاه، سیستم پایاب، جاده های دسترسی و هزینه های پیش بینی برای آینده، که از طراحی های مقدماتی در مرحله یک قابل استنتاج است.

۲. هزینه های تجهیزات الکترو مکانیکی : این هزینه ها شامل خرید توربین، ژنراتور، گاورنر، دریچه‌ها، تابلوهای کنترل و قدرت، تجهیزات پست، تجهیزات مصرف داخلی و تجهیزات الکتریکی و مکانیکی جانبی و غیره است. با توجه به ماهیت نیروگاههای آبی کوچک (برای نیروگاههای زیر ۵ مگاوات) برای هر کیلو وات توان نصب در بخش ارزی ۲۵۰ دلار و در بخش ریالی ۱۵۰۰۰۰۰ ریال برآورد شده است، که تخصیص ارزدربخش سیستم‌های کنترلی و گاورنینگ می باشد. سیستم کنترل فرض شده دستی است و در صورت در نظر داشتن کنترل از راه دور طبیعتاً هزینه‌ها افزایش خواهند داشت [۳و۴].

۳. هزینه های انتقال نیرو : هزینه های انتقال شامل هزینه های خط انتقال و تجهیزات پست مورد نیاز برای انتقال توان تولید شده به شبکه میباشد. هزینه انتقال بستگی به منطقه پروژه، نوع سیستم موجود، بزرگی و نوع نیروگاه آبی دارد و بهمین منظور هزینه خط انتقال بسته به طول خط خیلی مهم است و قسمتی از هزینه‌های پروژه را در بر خواهد گرفت.

۴. هزینه های غیر مستقیم : این هزینه ها شامل هزینه های طراحی و مهندسی پروژه، نظارت، مدیریت و در نظر گرفتن نرخ بهره و تورم در طول ساخت می‌باشد.

۴-۱ هزینه‌های مهندسی و طراحی پروژه،

### (Engineering and Design Costs)

هزینه های طراحی و مهندسی (E&D) تحت تاثیر بسیاری از پارامترها شامل نوع، اندازه و موقعیت منطقه ای است که پروژه در آن انجام میشود. در طی مراحل مطالعه هزینه‌های E&D معمولاً با درصدی از هزینه های ساخت بیان میشود و مقدار این درصد از یک ناحیه به ناحیه دیگر متفاوت است. اخیراً یک نمونه مطالعاتی در مورد این نیروگاه‌ها نشان داده است که این مقدار را میتواند ۵ الی ۸ درصد در نظر گرفته شود (۸ درصد برای پروژه های خیلی بزرگ و ۵ درصد برای پروژه های کوچک و متوسط) [۳و۵].

۴-۲ هزینه‌های نظارت و مدیریت،

### (S&A=Supervision and Administration)

این هزینه ها شامل هزینه‌های تملیک زمین، بازرسی و نظارت، هزینه مدیران و هزینه های دیگر در منطقه است و شبیه هزینه‌های E&D بصورت درصدی از هزینه‌های ساخت بیان میشود. اخیراً یک نمونه مطالعاتی در مورد این نیروگاهها نشان داده است که این مقدار را میتوان ۴ الی ۷ درصد در نظر گرفت. [۳و۵]

#### ۳-۴ در نظر گرفتن نرخ تورم در طول ساخت

برای محاسبه دقیق میزان سرمایه گذاری یک پروژه لازم و ضروری است که نرخ تورم در طول ساخت پروژه مورد بررسی قرار گیرد و هزینه ها با توجه به نرخ تورم تعدیل گردند. نرخ تورم سالهای آتی را میتوان با توجه به شرایط، تورم میانگین مستخرج از سالهای گذشته در نظر گرفت.

#### ۵. هزینه های سالیانه

برای بدست آوردن سود خالص یک پروژه علاوه بر سرمایه گذاری در بندهای ۱ الی ۴ جهت ساخت، محاسبه هزینه های سالیانه نیز ضروری است. این هزینه ها عبارتند از استهلاك سرمایه، بهره برداری، تعمیرات، نگهداری و هزینه های جایگزینی و نوسازی تجهیزات.

#### ۵-۱ استهلاك تجهیزات

تعیین روشهای شناخت استهلاك و عوامل موثر در آن مبنایستی در تجزیه و تحلیل اقتصادی پروژه ها منظور گردند.

#### ۵-۲ بهره برداری - تعمیرات - نگهداری،

(O&M=Operating & Maintenance)  
این هزینه ها شامل حقوق پرسنل، کارگران، بیمه، مالیات، عوارض، فضای سبز و مواد مصرف شدنی است این هزینه ها را فقط ضریب تورم سالانه افزایش میدهد، که در محاسبات اقتصادی این ضریب تورم ۵ درصد منظور شده است. هزینه های مربوط به حقوق، دستمزد، و مواد مصرف شدنی یک درصد هزینه های سرمایه گذاری سالانه و هزینه های مربوط به بیمه، مالیات، عوارض و مواد پیش بینی نشده نیز یک درصد هزینه های سرمایه گذاری سالانه در نظر گرفته شده است. (لازم به ذکر است که در این بخش جهت محاسبه هزینه های سرمایه گذاری، نرخ بهره در طول ساخت منظور میگردد) [۶۵و۶۰].

#### ۵-۳ جایگزینی تجهیزات

مطمئناً قبل از آنکه عمر مفید اجزاء اصلی نیروگاه، بطور مثال سیم پیچ های ژنراتور، رانرهای توربین و فرسودگی قسمتهای دیگر، تمام شوند نیاز به جایگزینی و نوسازی خواهند داشت. با توجه به ماهیت این نیروگاهها هزینه های مربوط به نوسازی و بازسازی تجهیزات را در سال ۲۵ برابر ارزش کل تجهیزات در زمان حال در نظر گرفته شده است. قطعاً برای نیروگاههای بزرگ و متوسط میتوان درصد فرسودگی را به تفکیک برای بخشهای مختلف تعیین نموده و این هزینه ها را بشکل دقیق بدست آورد. [۳و۴]

#### ۲-۲-۲ فواید و درآمدهای حاصل از پروژه

برای این نیروگاهها دو فایده متصور است ۱. فایده محسوس ۲. فایده نامحسوس، درآمدهای محسوس شامل فروش برق است، بر اساس تصویب نامه هیئت وزیران و آئین نامه اجرائی نرخ تضمینی خرید برق توسط وزارت نیرو از نیروگاههای سایر موسسات موضوع بند (ج) و ماده (۱۲۲) قانون برنامه سوم توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی جمهوری اسلامی ایران و قانون بودجه سال ۸۰ کل کشور استفاده شده است. بر اساس این مصوبه خرید برق از چهار بخش ۱. دولتی ۲. دولتی که برق تولیدی را از طریق خطوط انتقال فشار متوسط یا ضعیف به مصرف می رسانند ۳. خصوصی ۴. خصوصی که برق تولیدی را از طریق خطوط انتقال فشار متوسط یا ضعیف به مصرف می رسانند پیش بینی شده، که در ماههای مختلف سال بر اساس اوج بار (۴ ساعت در روز) بارعادی (۱۲ ساعت در روز) و کم باری (۸ ساعت در روز) ارائه شده است. که برای بخش خصوصی نیز به نسبت سرمایه گذاری خصوصی به دولتی در چهار گزینه صدر صد، هفتادوپنج درصد، پنجاه درصد، بیست و پنج درصد سرمایه گذاری خصوصی نرخهای خرید

تخمینی برای هزینه در سالهای آتی داشت. البته شرائط اجتماعی اقتصادی و دورنمای آن در این مسائل گنجانده شده است. زمانیکه عملیات ساختمانی شروع شود سعی بر این است که پرداخت سالیانه از اواسط سال باشد، زیرا با این اقدام میتوان تاثیر نرخ تورم در افت سرمایه را کم کرد. برای این پروژه ها که مدت زمان سه سال جهت ساخت منظور شده است مطابق جدول (۱) ۳۷٪ سرمایه در وسط سال اول، ۵۶٪ آن در وسط سال دوم و ۷٪ آن در وسط سال سوم در محاسبات دخالت داده شده است. [۵۳]

جدول (۱) توزیع هزینه ها بر حسب سالهای ساخت

سالهای ساخت	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	٪۱۰۰	-	-	-	-	-
۲	٪۷۷	٪۲۳	-	-	-	-
۳	٪۳۷	٪۵۶	٪۷	-	-	-
۴	٪۱۶	٪۶۲	٪۱۸	٪۴	-	-
۵	٪۹	٪۴۹	٪۳۰	٪۹	٪۳	-
۶	٪۶	٪۳۱	٪۴۰	٪۱۵	٪۶	٪۲

### ۳-۲ روش انجام محاسبات قابلیت اطمینان

در این بخش شاخص قابلیت اطمینان "انتظار دست رفتن بار" (LOLE=Loss Of Load Expectation) بطریق مونت کارلو محاسبه شده است. الگوریتم مونت کارلو قویترین ابزار مهندسی است که ما را به تحلیل آماری عدم قطعیت های موجود در مسائل مهندسی قادر می سازد. این روش در حال مسائل پیچیده ای که متغیرهای تصادفی زیادی توسط معادلات غیر خطی به یکدیگر مرتبط شده اند، بسیار کار برد دارد. آنالیز مونت کارلو را می توان مانند روش شبیه سازی تصور کرد که بجای اجراء در عمل توسط کامپیوتر انجام می پذیرد. اساس تحلیل مونت کارلو، تولید مجموعه ای از اعداد

متفاوتی را ارائه کرده است. باتوجه به خرید برق با قیمت بالاتر حدود دو برابر نسبت به بار عادی و سه برابر نسبت به کم باری میتوان برنامه بهره برداری را بنحوی برنامه ریزی که بیشترین فایده حاصل گردد. در محاسبات اقتصادی ضریب تورم فروش برق در سالهای آتی ۵ درصد منظور شده است. درآمدهای غیر محسوس در برگیرنده اثرات مثبت زیست محیطی، کنترل سیلاب، کشاورزی و آبیاری، حوضچه های پرورش ماهی، اردوگاه و اماکن تفریحی و غیره می باشند که در نهایت باید به مقادیر کمی تبدیل شوند. درآمدهای نامحسوس در تحلیل اقتصادی پروژه منظور نگشته اند. در صورت در نظر گرفتن این اثرات، طبیعی است برای شاخصهای اقتصادی وضعیت مطلوبتری حاصل خواهد شد. [۴]

### ۳-۲-۲ مشخصات مالی و زمانی و نحوه

#### توزیع سرمایه

دوره استهلاک سرمایه برای هزینه های ساختمانی ۵۰ سال

دوره جایگزینی و نوسازی تجهیزات الکترومکانیکی

۲۵ سال

۳ سال

طول زمان ساخت

٪ ۱۰

نرخ بهره در سال

قیمت دلار برای بخش خصوصی ۸۵۰۰ ریال

(با در نظر گرفتن هزینه های تبعی)

٪ ۵

- نرخ تورم در سال

در جدول (۱) یک توزیع سرمایه در طول مدت سرمایه گذاری نشان داده شده است. این جدول برای پروژه هایی که زمان ساخت آنها بین یک تا شش سال میباشد کاربرد دارد [۵۳].

همانطور که از جدول توزیع سرمایه مشاهده میشود هزینه های ساختمانی در طی چندین سال بطور متوالی پرداخت میشوند. پس از تاثیر نرخ بهره و تورم می توان

### ۳- مطالعه موردی Case Study

نیروگاه مورد مطالعه به نام " ناری " است. این نیروگاه در غرب استان آذربایجان غربی در جنوب غربی شهرستان ارومیه بخش سیلوانا و در غرب روستای ناری قرار دارد. نوع نیروگاه جریان رودخانه ایست، و هدف تعیین ظرفیت نصب بهینه است.

#### ۳-۱ محاسبات انرژی نیروگاه ناری

براساس آمار روزانه رودخانه (آبراهه ناری و حوزه آبریز آن، بخشی از سرشاخه های حوزه آبریز رودخانه بار اندوز چای می باشد) و کسر حق آبه های مورد نظر در محل بند انحرافی، جدول منحنی تداوم جریان در ماههای مختلف مطابق جدول (۲) ارائه شده است. پس از مطالعات در بخش های مختلف تخصصی و مشخص شدن جانمایی طرح، طول کانال ۳/۶ کیلومتر و ارتفاع خالص طراحی ۳۰۰ متر حاصل شده است. بعلاوه قبل از ورودی پستاک و در انتهای مسیر کانال انتقال آب یک منطقه مناسب برای احداث مخزن وجود دارد [۱۰].

در ابتدا گزینه های قابل مطرح عبارتند از : حجم مخازن صفر، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰، ۲۰۰۰۰، ۲۵۰۰۰ مترمکعب با درصد احتمال وقوع دبی های ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد که حدود ۳۶ حالت را شامل می شود. پس از بررسی منحنی تداوم جریان و حجم مخازن مختلف چهارده حالت اصلاح تر تشخیص داده شده است بشرح ذیل :

گزینه (۱) با حجم مخزن ۵۰۰۰ مترمکعب، دبی طراحی ۰/۷ مترمکعب بر ثانیه و ظرفیت نصب MW ۱/۷۵۰ و درصد احتمال دبی های ۴۰ و ۶۰ درصد.

گزینه (۲) با حجم مخزن ۱۰۰۰۰ مترمکعب، دبی طراحی ۱ مترمکعب بر ثانیه و ظرفیت نصب MW ۲/۵ و درصد احتمال دبی های ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰

تصادفی است. اعداد تصادفی تولید شده یکنواخت دارای این خاصیت می باشند که برای فاصله انتخابی بین (۰ تا ۱) احتمال وقوعشان در هر جای این فاصله یکسان است. در این روش نخست  $n$  عدد تصادفی برای هر یک از پارامترهای تصادفی موجود در معادله مورد نظر تولید شده، سپس این معادله به ازاء تک تک اعداد تصادفی تولید شده حل می گردد. نهایتاً  $n$  مقدار برای معادله مورد نظر بدست می آید که با بکارگیری روابط مربوطه می توان اطلاعات آماری نمونه هیستوگرام را برای پاسخ بدست آورد. لازم به ذکر است که هر چه تعداد دفعات تکرار افزایش یابد، پاسخ همگرایی بیشتری نسبت به مقدار حقیقی می یابد. کاهش احتمال قطع مشترکین بطور مستقیم با افزایش تعداد واحدهای تولید (ژنراتورها) و در نتیجه افزایش سرمایه گذاری در مراحل طراحی و یا بهره برداری مرتبط می باشد. سرمایه گذاری بیش از حد مسلماً به بالا رفتن هزینه های بهره برداری منجر می شود که باید در ساختار تعرفه منعکس گردد. نتیجتاً محدودیتهای اقتصادی باعث کاهش قابلیت اطمینان سیستم می شوند. از سوی دیگر سرمایه گذاری کمتر باعث ایجاد وضعیت بر عکس می گردد. بنابراین باید مصالحه ای بین قابلیت اطمینان و محدودیتهای اقتصادی بر قرار کرد که این امر می تواند منجر به تصمیمات مشکل مدیریتی در هر دو مرحله طراحی و بهره برداری گردد. [۸ و ۷]

بطور کلی بررسی قابلیت اطمینان سیستمهای قدرت را می توان در سه بخش تولید، انتقال و توزیع انجام داد. در مبحث قابلیت اطمینان تولید، که مورد نظر این مقاله نیز می باشد، با فرض قابل اطمینان بودن بخشهای انتقال و توزیع، احتمال اینکه ظرفیت نصب شده تولید بتواند پاسخگوی بار باشد بحث می شود. الگوریتم محاسبه LOLE با استفاده از روش مونت کارلو بصورت شکل (۱) می باشد. [۹]

۶۰ و ۷۰ درصد.

گزینه (۳) با حجم مخزن ۱۵۰۰۰ مترمکعب، دبی طراحی ۱/۵ مترمکعب بر ثانیه و ظرفیت نصب ۳/۷ MW و درصد احتمال دبی های ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد.

گزینه (۴) با حجم مخزن ۲۰۰۰۰ مترمکعب، دبی طراحی ۲ مترمکعب بر ثانیه و ظرفیت نصب ۵ MW و درصد احتمال دبی های ۲۰ و ۳۰ درصد. در چهارده حالت فوق محاسبات انرژی بهینه صورت گرفته است، محاسبه انرژی به گونه ایست که با توجه به ظرفیت مخزن ذخیره و آبدهی رودخانه بهترین حالت جهت محاسبه و برآورد انرژی های حالت اوج، بار عادی و کم باری حاصل گردد. جدول (۳) نتایج محاسبات انرژی را برای گزینه های مختلف نشان می دهد.

مختلف بخش خصوصی نسبت به دولتی صورت گرفته است. و شاخصهای اقتصادی نسبت سود به هزینه (B/C=Benefit Cost Ratio)، ارزش حال خاص سرمایه NPV=Net Present Value)، (B-C) و هزینه هر کیلو وات ساعت انرژی بدست آمده اند. (نرخ بهره حاکم بر مطالعه ۱۰٪ در نظر گرفته میشود این نرخ جاذب سرمایه گذاری خارجی در کشورهای در حال توسعه میباشد که از طرف مجامع معتبر جهانی در مطالعات اقتصادی بخش توسعه منابع آب در نظر گرفته میشود در هر صورت اثر تغییر نرخ بهره با آنالیز حساسیت مورد بررسی قرار گرفته است). نتایج در جدول (۴) ارائه شده است.

### ۳-۳ محاسبات قابلیت اطمینان نیروگاه ناری

جهت بررسی تأثیر افزایش تعداد واحدها و در نتیجه افزایش هزینه بر شاخص LoLE، ترکیب متفاوتی از واحدهادر نیروگاه آبی ناری استفاده شده است.

که هر یک دارای مشخصات زیر می باشند استفاده می گردد:

$$P_G = 1.25[MW],$$

$$N = 50[years]$$

$$\lambda = \frac{1}{25} \left[ \frac{f}{year} \right] \quad \text{نرخ خرابی}$$

$$\mu = 2 \left[ \frac{r}{year} \right] \quad \text{نرخ تعمیر}$$

مقادیر حداقل و حداکثر بار بر اساس میزان بار درسالهای مختلف در نظر گرفته شده اند، مشخصات بار به شرح زیر می باشد، (جهت اطمینان بر روی مقادیر بار نیز آنالیز حساسیت صورت گرفته است).

$$\begin{cases} PL \max = 3.5[MW] \\ PL \min = 1[MW] \end{cases}$$

### ۲-۳ محاسبات اقتصادی نیروگاه ناری

هزینه های ساختمانی و تجهیزات نیروگاه ناری بشرح ذیل است: گزینه (۱) هزینه تجهیزات و سیویل به ترتیب ۱۰۵۲۰ و ۷۰۱۳ میلیون ریال، گزینه (۲) هزینه تجهیزات و سیویل به ترتیب ۱۲۶۸۰ و ۷۴۰۴ میلیون ریال، گزینه (۳) هزینه تجهیزات و سیویل به ترتیب ۱۶۱۸۰ و ۷۸۶۳ میلیون ریال، گزینه (۴) هزینه تجهیزات و سیویل به ترتیب ۱۹۴۳۰ و ۱۰۰۰۰ میلیون ریال.

با توجه به هزینه های صورت گرفته و درآمد حاصل از آن و مبانی ارائه شده تجزیه و تحلیل اقتصادی صورت گرفته است (مبنای اقتصادی به گونه ایست که بخش سرمایه گذار می تواند وامی ازیک منبع مالی دریافت نماید، و با یک نرخ بهره مشخص در زمان بهره برداری پروژه آن را با اقساط سالانه بازپرداخت نماید). محاسبات اقتصادی برای بخشهای کاملاً خصوصی، کاملاً دولتی و با درصد سرمایه گذاری

می باشد که ممکن است چندان مطلوب نباشد، بعلاوه PF و شاخص های اقتصادی نیز چندان مناسب نیستند. این در حالیست که با ظرفیت نصب ۳/۷ مگاوات تعداد خاموشی ها تقریباً مناسب بوده ضریب کارکرد (PF) و شاخص های اقتصادی بسیار مناسب هستند. و هزینه هرکیلو وات ساعت انرژی نیز در حد متعارفی قرار دارد.

#### ۴- نتیجه گیری

۱. یکی از مهمترین مسائل در طراحی نیروگاههای آبی کوچک تعیین ظرفیت نصب بهینه است. در این مقاله نحوه محاسبات انرژی، محاسبات اقتصادی، محاسبات قابلیت اطمینان بیان شده است و نهایتاً الگوریتم فوق برای یک نیروگاه نمونه مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. بر مبنای یک الگوریتم (با استفاده از نرم افزار Excel) به روش آنالیز حساسیت شاخص های اقتصادی محاسبه شده است.

۳. بر مبنای یک الگوریتم (با استفاده از نرم افزار Matlab) به روش مونت کارلو شاخص های اقتصادی محاسبه شده است.

۴. از طریق برقراری مصالحه متقابل بین شاخص های فنی - اقتصادی و شاخص های قابلیت اطمینان ظرفیت نصب بهینه بدست آمده است.

۵. روش فوق برای یک نیروگاه نمونه بنام "ناری" اعمال شده و با مقایسه ضریب کارکرد نیروگاه (PF)، شاخص های B/C, NPV, B-C, Rial/kWh (هزینه هر کیلووات ساعت) و شاخص قابلیت اطمینان LOLE ظرفیت نصب بهینه ۳/۷ مگاوات بدست آمده است.

تعداد تکرار جهت محاسبه LOLE در روش مونت کارلو ۲۰۰۰ می باشد (Trials = ۲۰۰۰). با نصب تعداد متفاوتی از واحدهای آبی بعنوان نمونه گزینه (۱) ۲×۹۰۰ kW، گزینه (۲) ۲×۱۲۵۰ kW، گزینه (۳) ۳×۱۲۵۰ kW و گزینه (۴) ۲×۲۵۰۰ kW (مشابه ۴×۱۲۵۰ kW) محاسبات صورت گرفته که نتایج مندرج در جدول (۵) حاصل شده است.

جدول (۵) شاخص قابلیت اطمینان جهت نیروگاه ناری

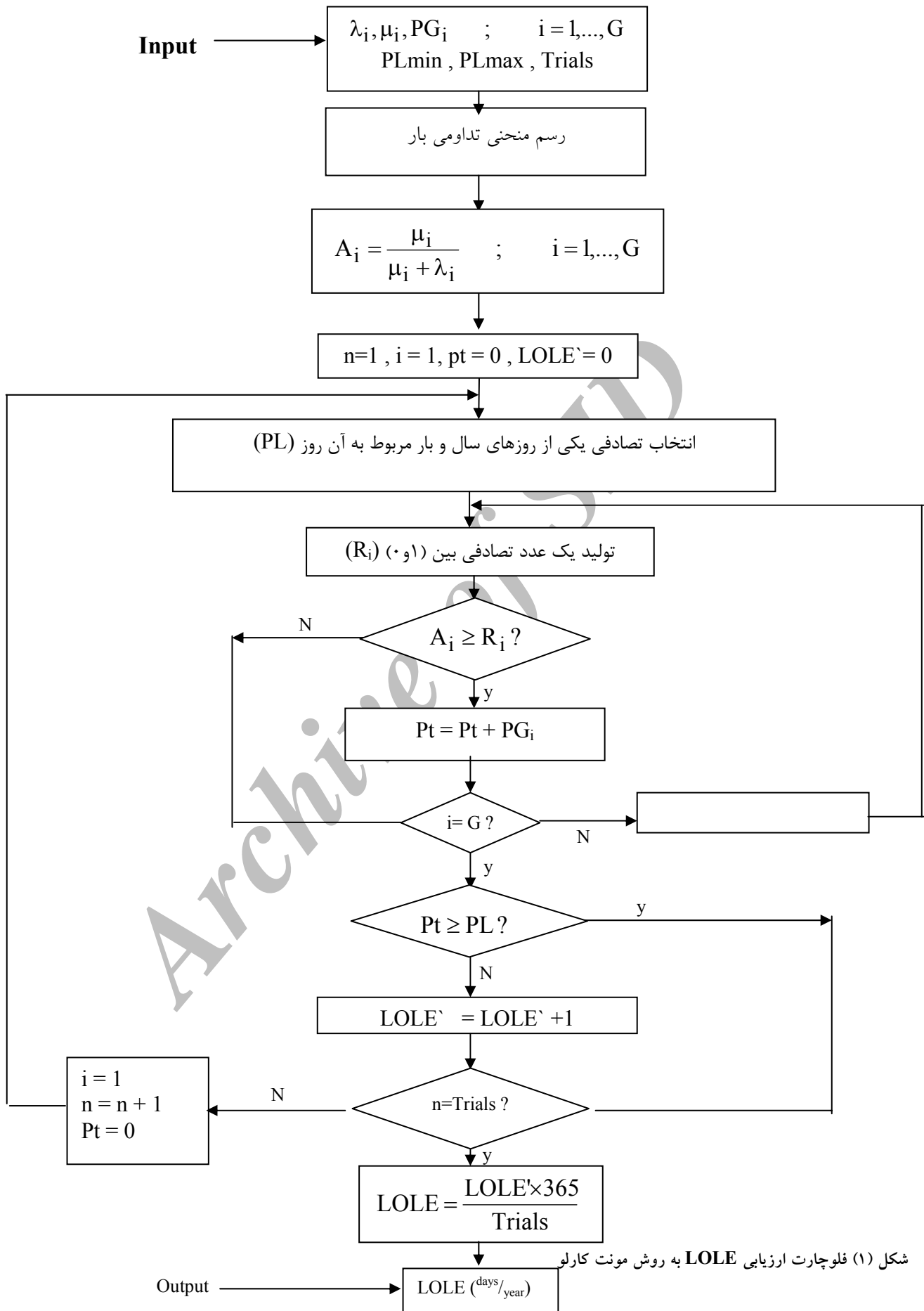
شاخص LOLE (سال / روز)				حداقل و حداکثر بار Mw
گزینه ۱	گزینه ۲	گزینه ۳	گزینه ۴	
۳۶۵	۲۲۰	۴۸	۴/۵	۱/۵-۴
۳۲۰	۱۵۰	۱۰	۰/۳۶	۱-۳/۵
۲۶۸	۱۹۰	۵۰	۶/۷۵	۱-۴
۲۹۰	۲۳۰	۲۵	۱۰/۵	۱-۵

#### ۳-۴ نتایج تحلیل

با توجه به نتایج ارائه شده در جداول (۴)، (۵) و (۶) و بررسی شاخص های فنی - اقتصادی و قابلیت اطمینان حالت شماره (۱۰) یعنی گزینه با ظرفیت نصب ۳۷۰۰ MW و دبی طراحی ۱/۵ m<sup>3</sup>/s و حجم مخزن ۱۵۰۰۰ m<sup>3</sup> با میزان انرژی تولیدی سالانه ۱۱/۵۷ GWh، ضریب کارکرد (PF) ۳۵/۸، B/C=۲/۶۷، NPV=۴۸۹۳۲/۴ میلیون ریال، Rial/kWh=۲۳۵/۳ و شاخص LOLE مناسب تر در حالت های مختلف بار بعنوان گزینه برتر انتخاب گردید.

همانطور که نتایج نشان می دهند با افزایش ظرفیتهای نصب شده، LOLE کاهش می یابد. بطوریکه حتی با ظرفیت نصب ۵ مگاوات (گزینه ۴) خاموشی در سال به حداقل ممکن و حتی صفر می رسد، معهداً این مساله مستلزم پرداخت هزینه بیشتری جهت تولید هر کیلو وات ساعت انرژی برق





شکل (۱) فلوجارت ارزیابی LOLE به روش مونت کارلو

جدول (۲) منحنی تداوم جریان قابل برداشت در ماههای مختلف ( $m^3/s$ )

اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	احتمال دبی %
۳/۰۲	۱/۸۳	۳/۱۳	۲/۰۱	۱/۹۰	۰/۵۰	۰/۴۲۳	۰/۶۴	۱/۷۵	۲/۸۴	۴/۵۵	۶/۰۵	۵
۰/۵۳۴	۰/۳۳۱	۰/۲۹۵	۰/۴۳۳	۰/۴۷۲	۰/۲۵۳	۰/۲۵۷	۰/۴۵۷	۱/۱۹۷	۲/۱۲۶	۲/۳۰۱	۱/۴۷۶	۱۰
۰/۴۱۵	۰/۲۶۲	۰/۲۵۵	۰/۲۹۱	۰/۳۲۵	۰/۲۱۰	۰/۲۲۵	۰/۳۴۹	۰/۹۲۴	۱/۷۲۰	۱/۸۵۵	۱/۱۵۳	۲۰
۰/۳۴۰	۰/۲۳۵	۰/۲۳۱	۰/۲۵۹	۰/۲۸۰	۰/۱۵۹	۰/۱۶۴	۰/۲۸۸	۰/۷۷۸	۱/۳۷۸	۱/۶۵۷	۰/۹۳۸	۳۰
۰/۲۹۰	۰/۲۱۶	۰/۲۱۳	۰/۲۴۰	۰/۲۵۱	۰/۱۵۶	۰/۱۳۵	۰/۲۳۸	۰/۵۷۳	۱/۲۱۸	۱/۵۶۲	۰/۷۹۱	۴۰
۰/۲۵۰	۰/۲۰۵	۰/۲۰۴	۰/۲۲۶	۰/۲۲۶	۰/۱۴۸	۰/۱۲۴	۰/۲۰۰	۰/۵۵۴	۱/۰۶۹	۱/۳۶۳	۰/۶۶۶	۵۰
۰/۲۳۸	۰/۱۹۳	۰/۱۹۵	۰/۲۱۲	۰/۲۰۰	۰/۱۳۹	۰/۱۰۷	۰/۱۷۲	۰/۴۳۳	۰/۹۴۸	۱/۲۴۵	۰/۵۵۷	۶۰
۰/۲۲۰	۰/۱۸۱	۰/۱۸۵	۰/۱۹۷	۰/۱۷۳	۰/۱۲۲	۰/۰۹۷	۰/۱۵۲	۰/۳۱۲	۰/۸۴۸	۱/۱۱۴	۰/۴۶۱	۷۰
۰/۲۰۰	۰/۱۶۹	۰/۱۷۲	۰/۱۸۲	۰/۱۶۲	۰/۱۰۷	۰/۰۸۳	۰/۱۳۶	۰/۲۵۱	۰/۶۷۴	۰/۹۴۱	۰/۳۹۱	۸۰
۰/۱۷۶	۰/۱۵۶	۰/۱۵۹	۰/۱۶۵	۰/۱۴۲	۰/۰۹۴	۰/۰۷۵	۰/۱۱۵	۰/۱۶۰	۰/۴۰۴	۰/۷۹۷	۰/۳۱۰	۹۰
۰/۱۱۹	۰/۱۰۹	۰/۱۲۶	۰/۱۴۴	۰/۱۰۲	۰/۰۶۳	۰/۰۵۳	۰/۰۷۳	۰/۱۱	۰/۲۹۵	۰/۶۳	۰/۱۸۶	۹۵

جدول (۳) انرژی بدست آمده برای گزینه های مختلف نیروگاه ناری

حالت	شماره گزینه	احتمال دبی %	انرژی اوج GWh	انرژی پایه GWh		کل انرژی GWh	ضریب کارکرد نیروگاه PF
				بار عادی	کم باری		
۱	۱	۴۰	۲/۶۴	۳/۵۶	۲/۲۴	۸/۴۴۲	٪۵۵/۳
۲	۱	۶۰	۲/۶۴	۳/۲۴۵	۱/۵۶۶	۷/۴۵۱	٪۴۸/۸
۳	۲	۲۰	۳/۶۲	۵/۲۵۷	۲/۳۵۲	۱۱/۲۲۹	٪۵۱/۵
۴	۲	۳۰	۳/۴۴۲	۴/۶۰۴	۲/۱۴	۱۰/۱۸۶	٪۴۶/۵
۵	۲	۴۰	۳/۳۲۵	۳/۹۸۴	۱/۹۲	۹/۲۲۹	٪۴۲/۳
۶	۲	۵۰	۳/۱۵۶	۳/۶۲۳	۱/۸	۸/۵۸۲	٪۳۹/۳
۷	۲	۶۰	۳/۰۲۵	۳/۴۰۵	۱/۳۸۴	۷/۸۱۴	٪۳۵/۸
۸	۲	۷۰	۲/۸۳	۲/۸۶۲	۱/۲۵۴	۶/۹۴۶	٪۳۱/۹
۹	۳	۲۰	۵/۵۱	۵/۳۵۶	۲/۹۰۴	۱۳/۷۷	٪۴۲/۷
۱۰	۳	۳۰	۴/۹۹	۴/۱۳۶	۲/۴۴	۱۱/۵۶۶	٪۳۵/۸
۱۱	۳	۴۰	۴/۳۹۵	۳/۵۹۷	۱/۸۳۶	۹/۸۲۸	٪۳۰/۵
۱۲	۳	۵۰	۵/۰۲	۳/۱۰۷	۱/۳۳۹	۹/۴۶۶	٪۲۹/۳
۱۳	۴	۲۰	۶/۴۱۶	۴/۵۴	۲/۸۳۲	۱۳/۷۸۸	٪۳۱/۶
۱۴	۴	۳۰	۵/۹۳۵	۳/۳۸۶	۲/۲۰۸	۱۱/۵۲۹	٪۲۶/۴

جدول (۴) شاخص های اقتصادی برای گزینه های مختلف نیروگاه ناری به ازاء درصدهای مختلف سرمایه گذاری خصوصی

شماره گزینه	احتمال دبی %	شاخص اقتصادی B/C					NPV شاخص اقتصادی					Rial/ kWh
		p/t=1	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۲۵	۰	p/t=1	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۲۵	۰	
۱	۴۰	۲/۳۹	۲/۱۸	۱/۹۷	۱/۷۷	۰/۹۷	۲۹۴۰۲/۲	۲۴۹۸۹/۷	۲۰۵۷۷/۱	۱۶۱۶۴/۶	۷۳۳/۸۸	۲۳۴
۱	۶۰	۲/۲۲	۲/۰۲	۱/۸۳	۱/۶۳	۰/۹۱	۲۵۷۸۵/۴	۲۱۶۲۱/۳	۱۷۴۵۷/۳	۱۳۲۹۳/۲	-۱۸۷۲/۴۸	۲۶۵
۲	۲۰	۲/۸۲	۲/۵۷	۲/۳۲	۲/۰۷	۱/۱۴	۴۴۲۰۶/۲	۳۸۱۸۲/۲	۳۲۱۵۸/۱	۲۶۱۳۴/۱	۳۵۰۸/۵	۲۰۲
۲	۳۰	۲/۶۱	۲/۳۸	۲/۱۵	۱/۹۲	۱/۰۶	۳۸۹۰۲/۹	۳۳۳۲۷/۸	۲۷۷۵۲/۸	۲۲۱۷۷/۷	۱۵۵۲/۷	۲۲۱/۸
۲	۴۰	۲/۴۳	۲/۲۱	۱/۹۹	۱/۷۸	۱	۳۴۳۴۸/۹	۲۹۱۵۰	۲۳۹۵۱/۱	۱۸۷۵۲/۳	-۷۰/۲۱	۲۴۳/۷
۲	۵۰	۲/۲۸	۲/۰۸	۱/۸۷	۱/۶۷	۰/۹۴	۳۰۷۲۸/۱	۲۵۸۵۰/۸	۲۰۹۷۳/۴	۱۶۰۹۶/۱	-۱۴۴۵/۸۹	۲۶۰/۸
۲	۶۰	۲/۱۳	۱/۹۴	۱/۷۵	۱/۵۶	۰/۸۸	۲۷۰۷۵/۷	۲۲۴۹۶/۲	۱۷۹۱۶/۷	۱۳۳۳۷/۲	-۲۷۶۴/۵۵	۲۸۵/۸
۲	۷۰	۱/۹۳	۱/۷۶	۱/۵۸	۱/۴۱	۰/۸۱	۲۲۲۹۰/۱	۱۸۱۲۲/۹	۱۳۹۵۵/۸	۹۷۸۸/۷	-۴۶۱۲/۲۲	۳۲۰/۷
۳	۲۰	۳/۰۹	۲/۸۱	۲/۵۳	۲/۲۵	۲/۲۸	۶۱۱۵۴/۹	۵۳۰۱۶/۵	۴۴۸۷۸/۱	۳۶۷۳۹/۷	۸۳۰۷/۴۱	۱۹۸/۲
۳	۳۰	۲/۶۷	۲/۴۳	۲/۱۹	۱/۹۵	۱/۱۲	۴۸۹۳۲/۴	۴۱۸۴۲	۳۴۷۵۱/۶	۲۷۶۶۱/۲	۳۵۴۶/۸۸	۲۳۵/۳
۳	۴۰	۲/۳۲	۲/۱۱	۱/۹۰	۱/۶۹	۰/۹۸	۳۸۴۸۱/۵	۳۲۳۱۸	۲۶۱۵۴/۵	۱۹۹۹۱	-۶۲۸/۸۷	۲۷۵/۸
۳	۵۰	۲/۴۲	۲/۲۰	۱/۹۷	۱/۷۵	۱/۰۴	۴۱۳۱۱/۲	۳۴۷۶۷/۵	۲۸۲۲۳/۷	۲۱۶۸۰	۱۲۵۹/۶۵	۲۸۵/۲
۴	۲۰	۲/۶۴	۲/۴۰	۲/۱۶	۱/۹۱	۱/۱۲	۵۹۶۸۲/۲	۵۰۸۹۱/۱	۴۲۱۰۰/۱	۳۳۳۰۹	۴۲۵۱/۶۳	۲۴۶/۳
۴	۳۰	۲/۴۲	۲/۱۹	۱/۹۷	۱/۷۵	۱/۰۴	۴۹۲۴۸/۵	۴۱۴۷۶/۵	۳۳۷۰۴/۵	۲۵۹۳۲/۵	۱۲۴۸/۹۴	۲۸۰

- Department of the Army U.S.Army crop of Dc 2034-1000'Engineering Washington "Engineering and Design Hydropower " 31 December 1985.
- International Atomic Energy Agency "Expantion planning for electrical generating systems A Guid Book" Vienna'1984.
- Roy Billinton & R.N.Allan, "Reliability evaluation of engineering systems", Second edition.
- IEEE, "IEEE recommended practice for design reliable industrial and commerical power systems (Gold book)".
- Roy Billinton & R.N.Allan, "Reliability evaluation of power systems".
- کارشناسان مدیریت مطالعات، "گزارش مرحله دوم نیروگاه ناری، وزارت نیرو شرکت آب نیرو، طرح نیروگاههای متوسط و کوچک، سال ۱۳۸۱.

## مراجع

- Energy Ministry of China, "Hydro Power Hand Book Chines Standard," 1990.
- سید محمدحسن حسینی و همکاران، "تجزیه و تحلیل اقتصادی نیروگاههای آبی با استفاده از سرمایه گذاریهای میان مدت با استفاده از روش آنالیز حساسیت،" اولین کنفرانس ملی نیروگاههای آبی، شرکت آب نیرو، خرداد ۱۳۸۲.
- سید محمد حسن حسینی، "بررسی فنی و اقتصادی نیروگاههای برق آبی کوچک"، چهارمین کنفرانس سراسری روستا و انرژی، چاه بهار، اسفند ۱۳۷۹.
- کارشناسان مدیریت مطالعات، "آئین نامه اقتصادی نیروگاههای آبی کوچک"، وزارت نیرو، شرکت آب نیرو، طرح نیروگاههای متوسط و کوچک.